

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA E POTENCIAL DE  
GERAÇÃO DE BIOGÁS DE LODOS DE ESGOTOS E  
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS.**

**CAIO ANGEL VOLTOLINI**

**ORIENTADOR: PAULO BELLI FILHO  
CO-ORIENTADOR WANDERLÍ ROGÉRIO LEITE**

2011/1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA E POTENCIAL DE GERAÇÃO  
DE BIOGÁS DE LODOS DE ESGOTOS E RESÍDUOS SÓLIDOS  
ORGÂNICOS.**

Trabalho apresentado à Universidade Federal  
de Santa Catarina para Conclusão do Curso  
de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental.

**CAIO ANGEL VOLTOLINI**

Orientador:  
Prof. Dr. Paulo Belli Filho  
Co orientador:  
Wanderlí R. Leite

FLORIANÓPOLIS/SC  
JULHO/2011

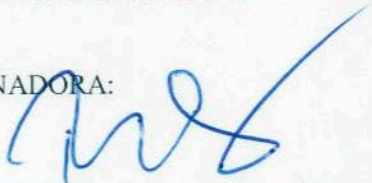
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA E POTENCIAL DE GERAÇÃO  
DE BIOGÁS DE LODOS DE ESGOTOS E RESÍDUOS SÓLIDOS  
ORGÂNICOS.**


CAIO ANGEL VOLTOLINI

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte  
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Paulo Belli Filho  
(Orientador)



Dr. Rodrigo Mohedano



Engª. Anigeli Dal Mago

FLORIANÓPOLIS/SC  
JULHO/2011

## **AGRADECIMENTO**

À minha família pelo afeto, amor e continuo exemplo de vida.

À Talita pelos momentos de paciência, alegria e apoio incondicional.

Ao Professor Paulo Belli Filho pelo aceite de minha proposta.

Ao Mestrando Wanderlí pela co orientação, ensinamentos impagáveis.

À família escoteira (adultos e jovens) por me ensinar a sorrir nas dificuldades.

Aos meus amigos e colegas pelos momentos de descontração.

Aos Membros da Banca Anigeli Dal Mago e a Rodrigo Mohedano pela disponibilidade em participar.

Ao CEASA/SC e a CASAN por disponibilizarem dados utilizados no presente trabalho.

Agradeço



*Criar é dar forma ao próprio destino*

Albert Camus

## RESUMO

A gestão sustentável dos resíduos nos centros urbanos na atualidade se encontra entre as maiores questões sócio-ambientais a serem mitigadas. No contexto brasileiro de crescimento econômico em conjunto à restrições ambientais crescentes a utilização de digestores anaeróbios no tratamento dos biosólidos gerados em centros urbanos, surge como tecnologia colaboradora à correta gestão de resíduos, com a grande vantagem de fornecer o biogás, rico em metano; fonte alternativa de energia.

O presente trabalho, visou apresentar o estado da arte dos diversos reatores de resíduos orgânicos, em especial fração orgânica de resíduos sólidos (FORSU) e lodo de esgoto (LE), para grandes volumes de resíduos, apesar desta tecnologia também ser altamente difundida para situações descentralizadas com o foco de atender pequenos volumes.

Foi dimensionado um sistema de digestão anaeróbia, composto por dois de reatores (Mistura Completa e UASB), capazes de degradar lodo de esgoto secundário provindo de estação de tratamento de efluente por lodo ativado e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, provindos da Central de Abastecimento de Santa Catarina. O projeto prevê três reatores de mistura completa de 3040m<sup>3</sup> cada e um reator UASB de 30m<sup>3</sup> os quais juntos são capazes de gerar até 150kw de energia. Que segundo o retorno energético, isto é, análise da viabilidade energética por meio do balanço energético, da construção à operação do sistema; determinou um tempo de retorno de 16,5 anos.

**PALAVRAS CHAVE:** Resíduos Orgânicos, Lodo de Esgoto, Reatores Anaeróbios, Biogás, Co-digestão.

## ABSTRACT

The sustainable waste management in urban centers today is among the highest socio-environmental issues to be mitigated. In the Brazilian context of economic growth together with increasing environmental restrictions on the use of anaerobic digesters in the treatment of biosolids generated in urban centers, collaborative technology emerges as the correct management of waste, with the advantage of providing biogas rich in methane source alternative energy.

This study aimed to present the state of the art of the various reactors of organic waste, especially organic fraction of solid waste (FORSU) and sewage sludge (LE), for large volumes of waste, although this technology also to be highly diffused situations decentralized with a focus to serve small volumes.

It was a scaled anaerobic digestion system, consisting of two reactors (UASB and Full Mix), capable of degrading sludge coming from secondary sewage treatment plant effluent by activated sludge and organic fraction of municipal solid waste emanating from the Central Supply Santa Catarina. The project includes three complete-mix reactors for each 3040m<sup>3</sup> and 30m<sup>3</sup> UASB reactor which together are capable of generating up to 150kW of power. That according to the energy return, that is, analyze the feasibility of energy through energy balance, from construction to operation of the system, set a turnaround time of 16.5 years.

Keywords: Organic Waste, Sewage Sludge, Anaerobic Reactor, Biogas

## Índice de Quadros

Quadro 1: - Operação e função das etapas de tratamento do lodo (Metcalf Eddy, 2004). .....	19
Quadro 2 - Fatores e Características que influenciam nos processos bioquímicos em Reatores Anaeróbios. ....	28
Quadro 3: - Comparação Reatores por via úmida e via seca Fonte: Metcalf; Eddy (2004).....	29

## Índice de Tabela

Tabela 1 - Características dos substratos utilizadas. ....	41
Tabela 2 - Características físico-químicas do lixiviado de RSO e lodo de esgoto.....	42
Tabela 3 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do reator UASB....	45
Tabela 4 - Resumo das características dos sistemas descritos de digestão anaeróbia. ....	48
Tabela 5 - Resultados do dimensionamento para o reator de mistura completa.....	49
Tabela 6 - Estimativo das características do lixiviado de entrada no reator UASB.....	50
Tabela 7 - Resultado do Dimensionamento do Reator UASB .....	50
Tabela 8 – Resultados e parâmetros utilizados para a produção de metano no Reator de Mistura Completa.....	51
Tabela 9 – Resultado e Parâmetros utilizados para análise da produção de metano reator UASB.....	51
Tabela 10 Parâmetros e utilizados para análise do potencial energético ....	52
Tabela 11 - Parâmetros dos valores para a análise energética, bem como os resultados obtidos .....	53

## Índice Figuras

Figura 1: Processos gerais de tratamento do lodo Fonte: Adaptado de Metcalf; Eddy (2004).....	20
Figura 2 - Etapas da digestão anaeróbia, em destaque as bactérias mais comuns em cada sub-etapa. Fonte: Khanal, (2008). ....	22
Figura 3 - Fluxograma do Ciclo da Digestão Anaeróbia. Fonte: Khanal (2008) .....	24
Figura 4 - Esquema representativo do processo WAASA, onde é possível visualizar a retirada de espuma e lodo bem como a recirculação de inoculo Fonte:Adaptado de Rapport, 2008. ....	31
Figura 5 Layout geral do funcionamento do sistema Valorga Fonte: Adaptado de Rapport, 2008.....	32
Figura 6 - Configuração geral do sistema Kompogas de digestão de biossólidos. Fonte: Adaptado de Rapport, 2008. ....	33
Figura 7 Esquema geral de reatores a dois estágios Fonte: Adaptado de Metcalf; Eddy, 2004. ....	34
Figura 8 Diagrama de funcionamento de digestão por Biopercolat. Fonte: Rapport 2008.....	35
Figura 9 Diagrama SEBAC de funcionamento, atentar a recirculação do lixiviado em cada etapa. Fonte Rapport (2008).....	37
Figura 10 Diagrama de Funcionamento do sistema APS de digestão. Fonte Rapport, (2008). ....	38

## Lista de Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;  
C – Carbono;  
CEASA - Central de Abastecimento do estado de Santa Catarina;  
CP – Capacidade Planta;  
DBO –Demanda Bioquímica de Oxigênio;  
DQO – Demanda Química de Oxigênio;  
EC – Energia Consumida;  
EG – Energia Gerada;  
EI – Energia de Instalação;  
ETE – Estação Tratamento de Esgoto;  
FORSU – Fração Orgânica de Resíduos Sólidos;  
FS – Fator de Segurança;  
IBGE - instituto brasileiro de geografia e estatística;  
IWA – International Water Association;  
LE – Lodo de Esgoto;  
N – Nitrogênio;  
NBR – Normativa Brasileira;  
P – Fósforo;  
RSO – Resíduos Sólidos orgânicos;  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos;  
TCO – Taxa de Carga Orgânica;  
TDH – Tempo de Detenção Hidráulica;  
TRS – Tempo de Retenção Sólidos;  
TRE – Tempo de Retorno Energético;  
SEBAC - Sequential Batch Anaerobic Composting  
ST – Sólidos Totais;  
SV – Sólidos Voláteis;  
UASB – Upflow Anaerobic Sludged Blanked;  
USEPA - United States Environment Protection Agency;  
pH – Potencial hidrogeniônico;

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>14</b>
<b>3. OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>15</b>
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS .....	16
4.2. LODO DE ESGOTO SANITÁRIO .....	17
4.2.1. Produção de Lodo .....	18
4.2.2. Tratamento de lodo .....	18
4.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	21
4.3.1. Histórico da Digestão Anaeróbia .....	21
4.3.2. Princípio bioquímicos das Reações Anaeróbias .....	21
4.3.3. Requisitos ambientais e condições do meio .....	25
4.4. REATORES ANAERÓBIOS .....	28
4.4.1. Sistemas de estágio Único .....	29
4.4.2. Sistemas de Estágios Múltiplos .....	33
4.4.3. Sistemas em Batelada .....	35
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
5.1. REATORES ANAERÓBIOS .....	40
5.2. DIMENSIONAMENTO .....	40
5.2.1. Características do Substrato .....	41
5.2.2. Tipo de Reator .....	43
5.2.3. Cálculo dos Reatores .....	43
5.2.4. Estimativa Produção Metano .....	45
5.2.5. Geração de Energia .....	46
5.3. ANÁLISE ENERGÉTICA .....	46
5.3.1. Balanço Energético .....	46
<b>6. RESULTADO .....</b>	<b>48</b>
6.1. REATORES ANAERÓBIOS .....	48
6.2. DIMENSIONAMENTO REATORES .....	49
6.2.1. Reator Mistura Completa .....	49
Reator UASB .....	50
6.3. GERAÇÃO ENERGIA .....	51
6.3.1. Geração Metano .....	51
6.3.2. Geração Total de Energia .....	52
6.4. ANÁLISE ENERGÉTICA .....	52
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A pesquisa nacional de saneamento básico de 2008, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE estima que diariamente no Brasil sejam coletadas 259.547 toneladas de resíduos, dos quais, 18% são destinados ainda a lixões a céu aberto, 16% aterros controlados e 64% para aterros sanitários. Verifica-se que ainda grande parte do resíduo é fonte de risco ao meio ambiente.

Dentre as varias tecnologia de tratamento de resíduos também se encontra a digestão anaeróbia, sendo esta tecnologia consolidada em todo o mundo e fortemente utilizada em países com configuração geopolítica semelhantes ao Brasil, como China e Índia, sendo principal vantagem a possibilidade de geração de biogás, combustível renovável e promissora fonte energética (IGONI *et al*, 2008; DEUBLEIN E STEINNHAUSER, 2008).

Segundo Deublein e Steinnhauser (2008),a implantação de sistemas descentralizados na China teve inicio já na década de 70, e hoje alcançando a marca de 18 mil reatores em todo o país. Segundo Rao *et al* (2010), para a situação indiana, a digestão anaeróbia será a mais promissora tecnologia para as futuras gerações no Nepal,o inicio se deu na década de 50, e que hoje contempla inúmeros caso de sucesso em todo o pais.

A escolha do tipo de reator anaeróbio é dada por inúmeros fatores inerente ao resíduo a ser digerido e às condições ambientais e financeiras (IGONI *et al*, 2008). Assim, o presente trabalho teve como buscou apresentar e descrever as condições de uso e reatores apropriados para a realidade catarinense, especificamente para co-digestão de lodo de esgoto e resíduos orgânico urbano.

Em conjunto à escolha do reator utilizado, se analisou o tempo de retorno energético da atividade, isto é, a quantidade de anos a fim de retornar a energia gasta para a construção, permitindo assim, a criação de mais um critério de escolha do sistema a ser implantado (ISHIKAWA, 2006).

## **2. JUSTIFICATIVA**

Em um contexto de crescimento nacional, é cada vez maior a demanda por energia, cuja diversificação é apontada por organismos internacionais (Organização das Nações Unidas, Banco Interamericano de Desenvolvimento) como caminho necessário ao desenvolvimento de qualquer nação. Segundo o Plano Nacional de Energia de 2007, para o ano 2030, aponta que 84,6% da energia necessária serão fornecidas por seis diferentes matrizes energéticas, diferentemente das quatro atuais, massivamente responsáveis pela produção energética nacional. Neste mesmo relatório, para 2030, a responsabilidade das fontes renováveis, será ampliada em até seis pontos percentuais.

Entre as possíveis fontes renováveis de energia, encontra-se o biogás, advindo da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), em conjunto com a biomassa dos sistemas de tratamento de efluentes urbanos (Lodo). Assim, a prospecção de novas tecnologias de conversão destes resíduos (lodo e FORSU) em biogás é fundamental a tomada inicial de decisão para futuros investimentos.

### **3. OBJETIVOS GERAIS**

O presente trabalho visa apresentar e descrever tecnologias que permitam a co-digestão anaeróbia de lodo e fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e a prospecção da produção de biogás, segundo uma tecnologia selecionada às condições em estudos.

#### **3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar descrever tecnologias que aliem estabilização de lodo e fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e produção de biogás;
- Listar e descrever parâmetros, critérios e etapas para o desenvolvimento de reatores anaeróbio para as condições de Florianópolis;
- Dimensionar um sistema de reatores e estimar a produção de biogás, perante as características do lodo adensado excedente de sistema de lodo ativado e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

A problemática dos resíduos sólidos urbanos (RSU) constantemente é fonte de discussão entre as mais diferentes áreas desde as ciências humanas, explanando sobre o estilo de vida e produção de resíduos, até as ciências aplicadas para as diferentes formas de tratamento e disposição (PROSAB, 2003)

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos em menor porcentagem, sendo suas características quali-quantitativas influenciadas, desde fatores sociais às condições climáticas (PROSAB, 2003).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 10.004, define os resíduos sólidos como aqueles que se apresentam nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Esta norma, classifica os resíduos em duas categorias:

- Resíduos classe I -

Perigosos: são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou destinados de forma inadequada. São resíduos que podem apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

- Resíduos classe II - Não perigosos: estes resíduos são subdivididos em resíduos classe II A (Não inertes) e resíduos classe II B (Inertes).

- Resíduos classe II A: são aqueles que não se enquadram na classe I (perigosos) ou na classe II B (Inertes). Estes resíduos podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe II B (inertes): são aqueles que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um

contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados, à concentrações superiores aos padrões de portabilidade de águas, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A fração orgânica de resíduos sólidos, segundo Mata-Alvarez *et al* (2000), entende-se como tal o resíduo orgânico biodegradável com um teor de umidade entre 85 e 90%.

#### 4.2. LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

O tratamento de efluente por lodos ativados é altamente difundido pelo Brasil. Nos sistemas de tratamento, o lodo é o principal resíduo no estado sólido ou semi-sólido, produzido dentre as diferentes etapas de tratamento, mas ao longo de todos os processos, são muitos outros resíduos gerados (PROSAB, 2006), podendo citar:

- Material gradeado: aquele presente no efluente com grandes dimensões, devido ao uso inadequado dos sistemas de saneamento ou dos defeitos inerentes a sua construção, ocasionando o aparecimento de britas, areias e siltes;
- Material flutuante ou escumas: são todos os materiais com densidade menor que a da água, assim como óleos, graxas, plásticos, papeis e etc.

Em uma ETE, o lodo produzido pode ser enquadrado segundo duas classificações (WANG *et al.*, 2008):

- Lodo Primário: sólidos e semi-sólidos gerados nos processos primários de tratamento de efluentes facilmente sedimentados por gravidade. Em comparação com os lodos químicos e biológicos, lodos primários possuem baixos requisitos de condicionamento e podem ser rapidamente desidratados por desidratação mecânica;
- Lodo Secundário: sólido e semi-sólidos gerados nos processos biológicos secundários de tratamento de efluente, caracterizado por alta presença biológica (matéria biodegradável);

Seja em lodo primário ou secundário, apresentam alto teor de material orgânico, nitrogenado e fosforado (CASSINI, 2003).

#### **4.2.1. Produção de Lodo**

O sistema de tratamento por lodos ativados destaca-se por ser altamente eficiente em remoção de matéria orgânica e atualmente, com algumas modificações de fluxo e recirculação, é capaz de remover nutrientes, sendo uma tecnologia altamente avançada, em termos de monitoramento dos parâmetros, entendimento dos processos microbiológicos e contínuo investimento em tecnologias para a redução de custo de operação dos atuais sistemas (METCALF; EDDY, 2004).

Nos sistemas de lodos ativados, que se encontra em boas condições de operação, o lodo gerado, geralmente apresenta aspecto marrom, não possuindo odor ofensivo, sendo rapidamente degradado por sua alta biodegradabilidade (METCALF; EDDY, 2004).

Em sistemas aeróbios, constituído principalmente de bactérias heterotróficas, a produção de lodo orgânico é entorno 0,3 Kg.Lodo/Kg.DQO de esgoto bruto (PROSAB, 2006).

#### **4.2.2. Tratamento de lodo**

Segundo Metcalf e Eddy (2004), o tratamento do lodo pode ser compreendido como o acondicionamento das características impactantes ao meio ambiente para o reuso ou disposição final. Os autores destacam que os processos e adequação repassam por diversos estágios. A Figura 1, detalha as possíveis tecnologias necessárias ao tratamento dos diferentes compostos presentes no lodo. O Quadro 1 descreve de maneira sucinta as etapas e suas respectivas funções.

Neste contexto, a digestão anaeróbia se apresenta, seja como meio de estabilização da matéria orgânica complexa, seja como método parcial de higienização da matéria sólida. Esta dualidade de aplicação é ressaltada de maneira mais evidente em tratamento termofílico, onde a ocorrência das reações dá-se numa faixa de temperatura entre 50 e 60°C, o que segundo a Agência de Meio Ambiente Norte Americana (USEPA), permite classificá-lo como resíduo bioestável classe A, passível de aplicação na agricultura (KIM *et al.* 2002).

**Quadro 1: - Operação e função das etapas de tratamento do lodo (Metcalf Eddy, 2004).**

<b>OPERAÇÃO</b>	<b>FUNÇÃO</b>	<b>FONTE</b>
Adensamento	Operação que visa aumentar a concentração de sólidos por meio da redução da porção da água, diminuição do volume total e maior eficiência do tratamento subsequente.	Metcalf Eddy, (2004)
Estabilização	A estabilização é o processo onde ocorre a redução da massa sólida proporcionando redução de patógenos, eliminação de odores ofensivos e matéria orgânica simples.	Metcalf Eddy, (2004)
Condicionamento	Operação preliminar permitindo melhor desaguamento por promover condições de segregação entre parte líquida e sólida. Bem como auxiliar na remoção de patógenos em alguns casos.	Metcalf Eddy, (2004)
Desaguamento	Etapa de redução do volume total por meio da saída da fração líquida do lodo.	Metcalf Eddy, (2004)
Higienização	inativação de organismos patogênicos, esgoto com finalidade de enquadrá-lo nos padrões permitidos para aproveitamento de lodos em sistemas agrícolas e é realizada principalmente para minimizar as preocupações de saúde pública	USEPA, 1979

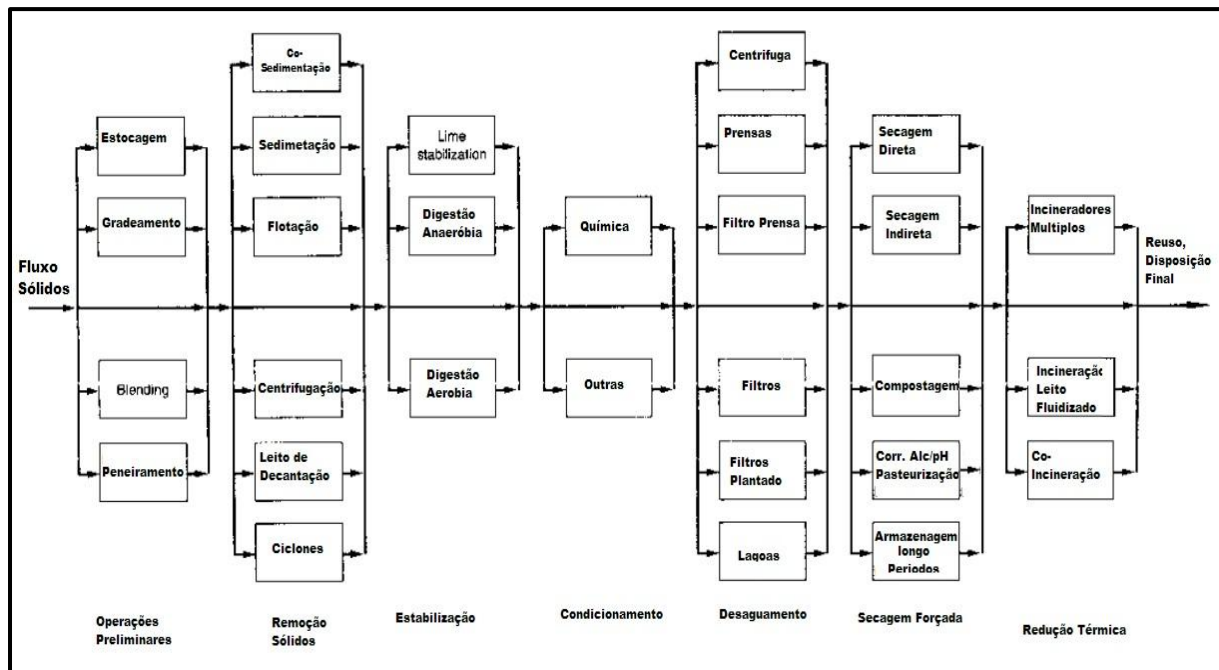


Figura 1: Processos gerais de tratamento do lodo  
 Fonte: Adaptado de Metcalf; Eddy (2004)



### 4.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA

#### 4.3.1. Histórico da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um fenômeno reconhecido, descrito e utilizado desde os sumérios, onde por volta de 3000 a.C., não propositalmente eles utilizavam covas e sistemas de tratamento de efluentes em condições anaeróbias que apresentavam flâmulas. Este mesmo fenômeno também é relatado por Plínio, por volta de 50 a.C., nas cloacas de Roma (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

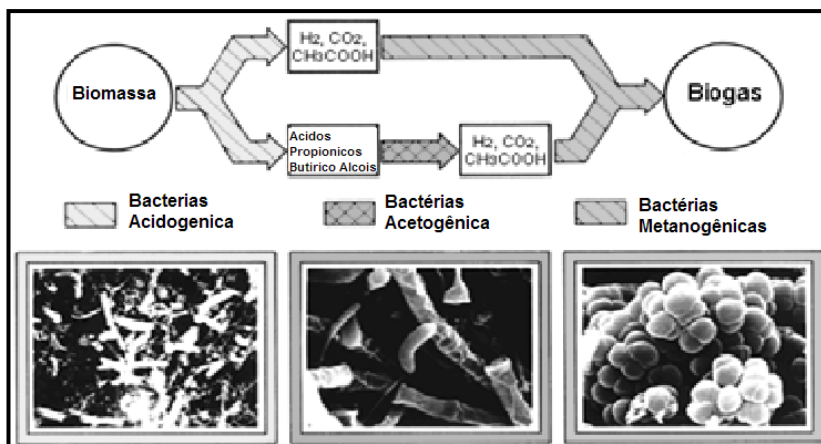
O aprofundamento nos estudos e aplicações se deu apenas no século XXVI, quando Alessandro Volta, com experimentos de coleta de gás no lago de Como, concluiu que o aparecimento do gás era devido a processos fermentativos. Béchamp, em 1868, associou à população de alguns microorganismos a formação do gás a partir de etanol (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

Em 1884, Louise Pasteur em conjunto com seu aprendiz Gavon, obtiveram por digestão anaeróbia de excrementos de cavalo da cidade de Paris, 100 litros de metano, a partir de 1000 litros de excrementos fermentados, o que segundo Pasteur na época, era suficiente para iluminar uma via de Paris e, assim, se iniciou na Europa, a aplicação do resíduo à produção de energia (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

#### 4.3.2. Princípio bioquímicos das Reações Anaeróbias

Segundo uma definição puramente bioquímica digestão é processo de hidrólise enzimática dos nutrientes de um sistema para a produção de seus componentes mais simples sendo anaeróbia a condição de ocorrência de tal reação isto é ausência de oxigênio (LEHNINGER, 2006).

Deublein e Steinhauser (2008), por sua vez, definem a digestão anaeróbia como as reações de degradação da matéria orgânica por meio de quatro etapas: hidrólise acidogênese, acetogênese e metanogênese realizada por diferentes microorganismos nas diversas etapas.



**Figura 2 - Etapas da digestão anaeróbia, em destaque as bactérias mais comuns em cada sub-etape. Fonte: Khanal, (2008).**

### 1) Hidrólise

A primeira fase do processo anaeróbio, consiste na simplificação da matéria orgânica de lipídeos, proteínas, polissacarídeos e ácidos nucleicos, em produtos mais simples, como monômeros solúveis em água, por meio da ação de enzimas extracelulares (METCALF;EDDY, 2006 e LI, 2010).

Devido à ação das enzimas celulares acontecerem no exterior da célula, sua cinética de ocorrência é extremamente influenciada pelas condições do meio e características do substrato (tamanho partículas, degradabilidade), o que torna a taxa de degradação hidrolítica, a etapa da digestão limitadora do processo biológico (LI, 2010).

A micro-biota capaz de excretar tais enzimas é bem variada, e composta principalmente por bactérias *Cellulomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora* e *Streptomyces* (LI, 2010).

### 2) Fermentação

A fermentação, segunda etapa do processo anaeróbio, apresenta duas principais vias para formação final de moléculas de cadeia curta (entre 1 a 5 carbonos). A via por processos de acidogênese e a via acetogênica. Uma porcentagem média da importância de cada processo

de formação destas cadeias simples, é possível ser visualizado na Figura 2 (METCALF; EDDY, 2004).

#### **a. Acidogênese**

Segundo Deublein e Steinhauser (2008), os diferentes monômeros obtidos a partir da hidrólise dos complexos orgânicos, são a sua vez, transformados em curtas cadeias de carbono, conforme relatado anteriormente. Sendo os complexos orgânicos, transformados conforme a seguintes reações e vias de transformação:

- **Carboidratos**

Formam ácidos propionicos, por ação de bactérias pela via do succinato e acrilil CoA;

Formam ácidos butíricos, por bactérias *Clostridium sp.* pela via da degradação do ácido butírico.

- **Ácidos Graxos**

Pelas aceto bactérias, ação de CoA e etapas de oxidação, são formados acetatos.

- **Aminoácidos**

Pela união de dois aminoácidos, um como aceptor de elétrons, e outro como doador de elétrons, em conjunto com acetato, amônia e CO<sub>2</sub>, são formados cisteínas e H<sub>2</sub>S. É conhecida como a reação de Stickland, realizado por bactérias *Clostridium botulinum*.

#### **b. Acetogênese**

Os produtos formados pela fase acidogênica servem de insumo para as bactérias subsequente, que por meio de reações endergônicas, isto é, liberam energia ao meio, permitindo a redução de CO<sub>2</sub> e H, em ácido acético, por meio de bactérias homoacetogênicas.

Quando a pressão parcial de Hidrogênio é baixa, a formação de H, CO<sub>2</sub> e acetato, são predominantemente dados por bactérias acetogênicas. Já quando a pressão de hidrogênio é alta, predomina a formação de ácidos butíricos, propionicos, valérico e etanol (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

### **3) Metanogênese**

A metanogênese em geral, é outra etapa que pode limitar a velocidade do processo de digestão anaeróbia, assim as condições do sistema devem atentar também, para as necessidades das bactérias



#### 4.3.3. Requisitos ambientais e condições do meio

Nos processos biológicos, as condições do meio são o principal fator de influência para as reações microbiológicas e, por conseguinte, no processamento da digestão dos resíduos e produção final de biogás (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

Para uma ótima fermentação, são muitos os parâmetros envolvidos correlacionados ao metabolismo microbiano. Os microorganismos fermentativos de hidrólise e acidogênese possuem requisitos diferentes dos microorganismos metanogênicos, assim permitindo, em modo geral, aos sistemas de dois estágios (detalhes no capítulo 4.4.2), proporcionarem condições adequadas a ambos os tipos de microorganismo, e por consequência, maior dos diferentes estágios (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

##### **Temperatura**

Dos fatores do meio ambiente que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes, pois os microorganismos não possuem meios de controle sob tal fator. Dessa forma, a temperatura no interior da célula é determinada pela temperatura ambiente externa, levando assim a uma seleção natural (IGONI *et al*, 2008).

As faixas de temperatura ótima para a ocorrência das reações microbiológicas são:

Mesofílica: com temperaturas entre 30 a 38°C, sendo mais empregada, devido à boa estabilidade na produção de biogás (KIELY, 1998 *apud* IGONI *et al*, 2008). Além disto, Tchobanoglous *et al* (2002) afirmam que sistemas tratamento biológico na faixa entre 25 e 35 °C, são mais eficientes para a estabilização da matéria orgânica.

Termofílica: com temperatura entre 44 e 57°C; caracteriza-se por maior eficiência em termos de reações biológicas (STEADMAN, 1975 *apud* IGONI *et al*, 2008). No entanto, os requisitos adicionais de calor necessários para operar em temperaturas mais elevadas são considerados raramente rentáveis de operar (TUROVSKIY, 2006).

Mattocks (1984) salienta que a escolha da temperatura de operação é vital, mas a baixa variabilidade é ainda mais fundamental, pois a variação de 1°C produz um estado de dormência nos organismo metanogênicos.

### **Razão Carbono Nitrogênio e demais nutrientes**

A razão entre carbono, nitrogênio e fósforo, determina o desempenho da digestão anaeróbia, constituindo muitas vezes o fator limitante do processo. A fração de carbono é a base para o fornecimento de energia e, o nitrogênio, a síntese de novos microorganismos. Segundo Igoni *et al*(2008), o uso de nitrogênio é 30 a 35 vezes mais rápida que o do carbono, assim, a relação Carbono:Nitrogênio, esta aproximadamente entre 35:1.

Deublein e Steinhauser (2008), estabelecem que a razão entre C:N pode variar entre 16:1 e 25:1, neste mesmo contexto de necessidade biológica de nutrientes, quando se estabelece a razão C:N:P:S, tende-se a valores de 500-1.000:15-20:5:3, quando utilizamos parâmetros de carbono como a DQO, tem-se então DQO:N:P:S de 800:5:1:0,5.

Na digestão anaeróbia, os seguintes nutrientes são necessários aos microorganismos metanogênicos: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12 (CHERNICHARO, 1997).

### **Tamanho das partículas / Superfície Específica**

O tamanho das partículas esta relacionado com a área superficial e a promoção das reações bioquímicas. Assim, quanto menor o tamanho da partícula, maior será a área da superfície específica e, portanto, a degradação ocorrerá mais rápida. Em substratos de fácil biodegradabilidade (baixo conteúdo de celulose, lignina, etc.) a cominuição possui baixa influencia na produção de biogás (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

### **Tempo de detenção hidráulica e tempo de retenção de sólidos**

Para o dimensionamento, um fator importante é o tempo que as bactérias necessitam para se reproduzir e metabolizar os sólidos voláteis. Os parâmetros chave são o Tempo de Retenção de Sólidos (TRS), tempo médio que os sólidos ficam retidos no digestor, e o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH). Eles podem ser definidos como:

- TRS, em dias, é igual à massa de sólidos no digestor (kg) dividido pela a massa de sólidos retirados por dia (kg/d).

- TRH, em dias, é igual ao volume de lodo no digestor ( $m^3$ ), dividido pelo volume de lodo digerido retiradas por dia ( $m^3/d$ ).

Para os sistemas de agitação contínua, o TRH pode ser calculado com base tanto na taxa de alimentação de lodo ou a taxa de remoção. Para tal sistema, o TRS e o TRH são iguais. Por isso, um TRS mínimo é essencial para garantir que as bactérias sejam produzidas na mesma taxa em que são retiradas diariamente. Cálculos baseados em cinética do processo apontam para um SRT crítica de 4,2 dias para a digestão anaeróbia de lodo de esgoto a 35°C (TUROVSKIY, 2006).

### **pH e alcalinidade**

O equilíbrio ácido-base que determina o pH do meio depende das reações biológicas e químicas, conforme Rouger (1987) citado por Henn (2005) as seguintes reações determina são:

- Produção e consumo de  $CO_2$ ;
- Produção e consumo de ácidos orgânicos;
- Produção e consumo de amoníaco; e,
- Liberação de cátions metálicos por eliminação metabólica de ânions orgânicos.

Na digestão anaeróbia, a faixa de pH ótimo é o resultado das diversas reações que ocorrem. A maioria dos autores considera que um pH entre 6,6 e 7,4 corresponde a uma condição ótima, embora se possa conseguir estabilidade na formação de metano numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0 (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

O valor do pH é importante porque interfere na atividade microbiana. Desequilíbrio no sistema provoca declínio do pH e altos valores de pH, mesmo em baixas concentrações de nitrogênio inibem a fermentação. Abaixo de 6,2 parece ocorrer toxicidade para as bactérias metanogênicas (HOHLFELD; SASSE, 1986 *apud* HENN, 2005).

### **Potencial redox (Eh)**

Em bioreatores necessita-se de baixo potencial redox. Culturas de bactérias metanogênica necessitam de um intervalo entre -300mV e -330mV e para bactérias fermentativas, tal concentração pode ser de até 0mV (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

### **Inibidores**

A respeito da toxicidade, Lettinga (1995), menciona que organismos anaeróbicos, particularmente os metanogênicos, são bastante suscetíveis a uma grande variedade de componentes. Os microrganismos anaeróbios são inibidos por substâncias presentes no fluxo afluente de lodo, como amônia, metais pesados, compostos halogenados e cianeto, e pelos subprodutos metabólicos de microrganismos, como amônia, sulfeto, e os ácidos graxos voláteis (KHANAL, 2008).

O Quadro 2 resume as características e fatores que influenciam nos processos de digestão anaeróbia

**Quadro 2 - Fatores e Características que influenciam nos processos bioquímicos em Reatores Anaeróbios. Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)**

<b>FATORES</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Geometria e operação	Dimensões Reator; Tipo de Reator; Escala de Operação (TRS, TDH);
Características do Substrato	Composição Substrato; Umidade; Teor de Sólido; Biodegradabilidade; Sazonalidade de Produção;
Condições Ambientais	Temperatura Externa; Sazonalidade;
Condições do Meio de Reação	Potencial Hidrogenionico; Alcalinidade; Potencial Redox; Temperatura interna; Pressão; Umidade.

#### **4.4. REATORES ANAERÓBIOS**

Os vários tipos de processos para a digestão anaeróbia podem ser classificados de diversas maneiras segundo o tipo de fluxo (Batelada ou Pistão), números de estágios (único ou múltiplos), via úmida (85% parte líquida) ou seca (menor que 85%) (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). A escolha de um destes sistemas dependerá de uma série de fatores econômicos, técnicos e ambientais PINTO (2006). O Quadro 3 apresenta uma breve comparação entre os reatores por via úmida e via seca.



**Quadro 3: - Comparação Reatores por via úmida e via seca**  
**Fonte: Adaptado de Metcalf; Eddy (2004)**

<b>REATORE VIA ÚMIDA</b>	<b>REATORE VIA SECA</b>
<p><b>Vantagens</b></p> <p>Largo espectro de resíduos aplicáveis;  Mais adequado a substrato pastoso;  Fácil ajuste do conteúdo de sólidos;  Melhor controle pH, NH<sub>3</sub>;  Fácil transporte dos resíduos finais;  Melhor contato entre substrato e trocadores de calor (caso necessário);  Liberação segura do gás;</p>	<p><b>Vantagens</b></p> <p>Compacto;  Sistema robusto, Baixa manutenção;  Baixo consumo de energia (15% da energia que produz);  Alta produtividade de gás;  Alta qualidade do gás produzido;</p>
<p><b>Desvantagens</b></p> <p>Alto consumo de energia;  Retenção de gás no substrato;  Odor ofensivo;</p>	<p><b>Desvantagens</b></p> <p>Automação moderna;  Pré-tratamento do substrato;  Difícil homogeneização;  Reciclagem do lodo;</p>

#### **4.4.1. Sistemas de estágio Único**

Os sistemas de um estágio são aqueles que geralmente as etapas acidogênicas e metanogênicas da digestão anaeróbia ocorrem em um único reator. A maioria dos reatores presentes na União Européia funciona com um único estágio. Esta larga aplicação é devido à simplicidade de projeto, facilidade de operação e baixo investimento econômico (VANDEVIVERE *et al.*, 2002 e DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

##### **Upflow Anaerobic Sludge Blanket**

Segundo Florêncio (1999), este reator consiste de um tanque de fluxo ascendente no qual microorganismos crescem dispersos, sem a necessidade de um material suporte, formando flocos ou grânulos densos, com alta resistência mecânica, que permanecem no reator. Na sua parte superior, há um separador trifásico (sólido – líquido – gás),

onde ocorre a remoção do gás produzido, assim como a sedimentação e retorno automático do lodo à câmara de digestão (METCALF;EDDY, 2004).

Dados fornecidos por Metcalf;Eddy (2004), referente ao desempenho do reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) em tratamento de efluentes industriais, apresentou resultados entre 75 a 80% de remoção de DQO com uma carga orgânica aplicada de 4 a 12 kg DQO/m<sup>3</sup> .dia, com um TRH de 4 a 12 horas.

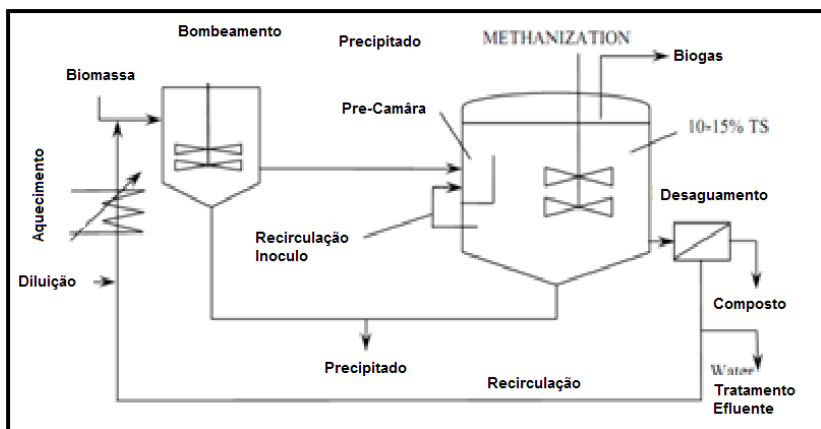
Este tipo de reator, quando aplicado corretamente apresenta grandes vantagens caracterizadas por ser um sistema compacto; ter baixo custo de implantação e operação; ter uma baixa produção de lodo; ter um baixo consumo de energia; ter satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO; possibilidade de uma rápida partida e elevada concentração de lodo excedente. A estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas do reator, leito e manta de lodo, sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo ascensional do efluente pela formação de gases (CHERNICHARO, 1997).

Para LIN (2000), um sistema moderno de tratamento anaeróbio pode ter alta eficiência no tratamento e um baixo tempo de retenção hidráulica (TRH), como é o processo de um reator UASB.

### **WAASA**

O sistema Waasa consiste de um despoldador vertical que homogeneiza o RSO entrada, e remove detritos flutuantes da superfície e partículas discretas do fundo do despoldador. Por diferença de densidade dos RSO a fração inferior, então é bombeada para a pré-câmara de um reator de agitação contínua (Figura 1). A pré-câmara ajuda a aliviar a curto-circuito e um meio de promover a inoculação assegura que os resíduos de entrada estão expostos a microorganismos, para minimizar o acúmulo de ácido e maximizar a digestão (RAPPORT, 2008).

Carga Orgânica típica para um reator a estágio único via úmida é de 4-8 kg SV/m<sup>3</sup>/d. Sendo o rendimento médio biogás específico seria 0,417 m<sup>3</sup>/kg SV (RAPPORT, 2008).

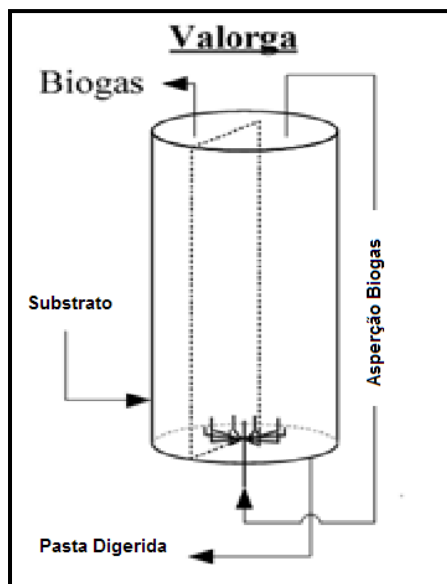


**Figura 4 - Esquema representativo do processo WAASA, onde é possível visualizar a retirada de escuma e lodo bem como a recirculação de inoculo**  
**Fonte: Adaptado de Rapport, 2008.**

### VALORGA

Digestor de alta taxa de sólidos, alimentado com FORSU (25-30 % de conteúdo ST), utilizando vapor para aquecimento de água, e possuindo um processo de diluição da alimentação de entrada, conforme necessário. A operação, em termo de temperatura, pode ser mesofílica ou termofílica, dependendo da matéria-prima e sustentabilidade econômica. O reator consiste num processo contínuo de fase única, modificado para utilizar o biogás pressurizado para homogeneizar o substrato. Assim, eliminando a necessidade de uma recirculação de inoculação (RAPPORT, 2008).

O reator é constituído de um cilindro vertical exterior com uma parede interna estendendo-se cerca de  $\frac{2}{3}$  do diâmetro do tanque, o material entra pelo fundo de um lado da parede interna e deve fluir em torno da parede. O tempo de retenção é da ordem de três semanas. O biogás é injetado na base do reator e as bolhas proporcionam meio para a mistura e manter os sólidos em suspensão (RAPPORT, 2008).



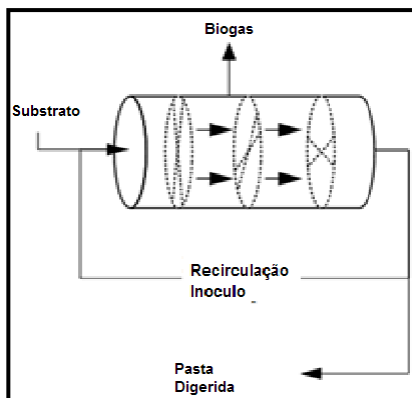
**Figura 5** Layout geral do funcionamento do sistema Valorga  
**Fonte:** Adaptado de Rapport, 2008.

Valorga é um sistema robusto e popular de fase seca. Segundo Nichols (2003) citado por Rapport (2008), matérias-primas com menos de 20% ST não têm bom desempenho no sistema, pois as partículas discretas podem sair rapidamente, provocando assim, o entupimento e impossibilitando a recirculação de gás. A produtividade de biogás tem sido relatada na faixa de 0,22-0,27 m<sup>3</sup>/KgSV, indicando um teor de SV no FORSU de 35-60%.

## **KOMPOGAS**

Kompogas é um digestor de fluxo horizontal com rotores internos para ajudar a desgaseificação e homogeneização. O sistema é pré-fabricado em dois tamanhos: 15.000 ou 25.000 ton./ano. Capacidades maiores podem ser obtidas por meio da combinação das unidades em paralelo. O substrato interno tem de ser cuidadosamente mantida entre 72-77 % de SV para que o sistema flua corretamente, por isso, é possível a diluição no início do processo com a FORSU de entrada. Isso também garante que o substrato de entrada seja inoculado,

evitando o acúmulo de ácido na extremidade frontal do digestor. O sistema opera com um tempo de retenção de 15-20 dias, sob condições termofílicas. Produção de biogás foi relatada na 0,11-0,13 m<sup>3</sup>/kg em peso úmido (RAPPORT, 2008).



**Figura 6 - Configuração geral do sistema Kompogas de digestão de biossólidos.**  
**Fonte: Adaptado de Rapport, 2008.**

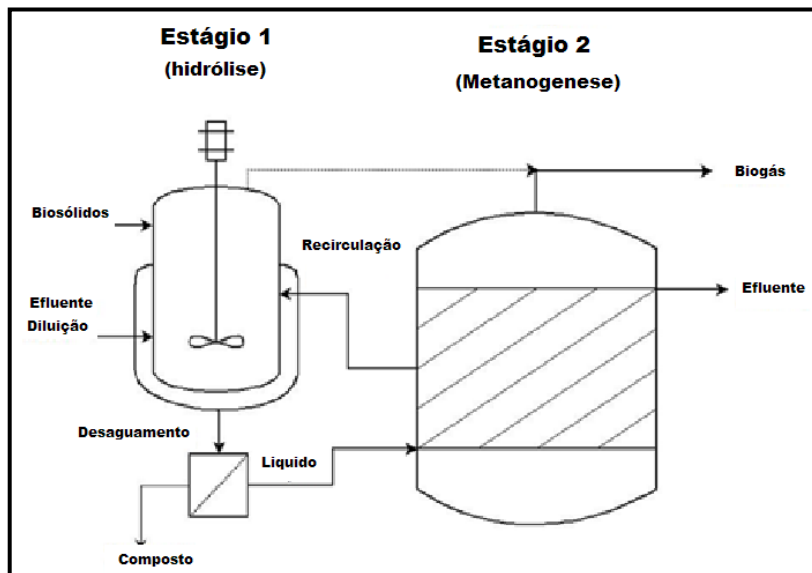
#### **4.4.2. Sistemas de Estágios Múltiplos**

O sistema a dois estágios é composto por um primeiro reator onde predomina a ação dos microrganismos hidrolíticos e formadores de ácidos, caracterizado por um processo lento, e um segundo, onde a ação dos microrganismos, acetogênicos e metanogênicos, predominam (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

Os sistemas em dois estágios encontram bom desempenho, mesmo com a ocorrência da variação de carga orgânica volumétrica, devido à heterogeneidade dos resíduos, alimentação variável ou ainda excesso de substâncias inibidoras nos resíduos como, o nitrogênio (VANDEVIVERE *et al.*, 2002 *apud* PINTO, 2006).

Nos processos de dois estágios, a acidogênese ocorre em pH abaixo de seis, e tempo de retenção de sólidos baixo; conduz a uma elevada produção de ácidos voláteis. Na fase metanogênica a maximização da produção de metano pode ser dada com o pH neutro e um longo tempo de retenção de sólidos (METCALF; EDDY, 2004).

A vantagem de sistemas múltiplos esta na flexibilidade de diferentes operações, conforme a necessidade de tratamento e possibilidade dos requisitos ambientais (temperatura externa, variação da temperatura (METCALF; EDDY, 2004). A Figura 7, ilustra de maneira geral o funcionamento dos reatores a dois estágios, onde a ocorrência da hidrólise e metanogênese ocorre em distintos meios.

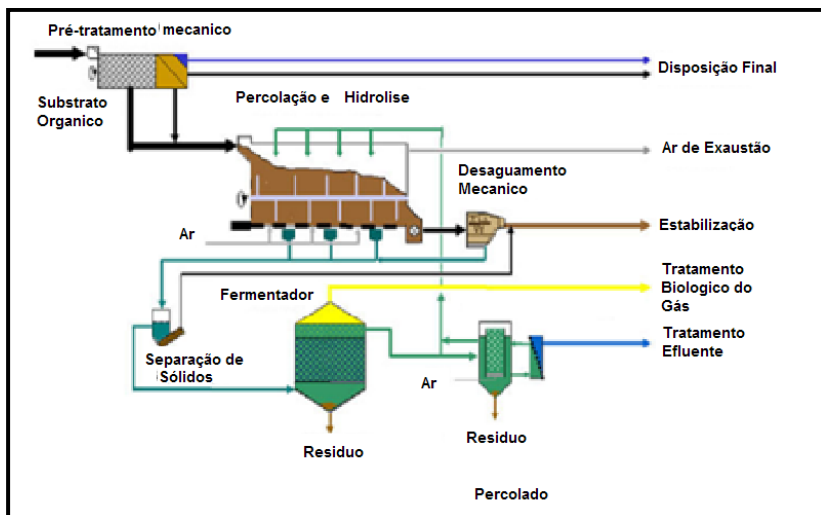


**Figura 7** Esquema geral de reatores a dois estágios  
**Fonte:** Adaptado de Metcalf; Eddy, 2004.

### **WEHRLE Umwelt GmbH (Biopercolat)**

No sistema de Biopercolat, a etapa de hidrólise é realizada sob condições aeróbias parcial com alto teor de sólidos (Figura 8). A fase líquida, continuamente filtrada dentro do reator tubular horizontal de hidrólise, que gira lentamente, possibilitando arejar parcialmente a mistura e impedir a obstrução da canalização. O lixiviado passa para o reator de fermentação de segundo estágio, um filtro anaeróbio de fluxo pistão, onde o material opera preferencialmente à temperatura mesofílica. Depois de 2-3 dias no primeiro estágio, os sólidos são separados e transferidos para outro reator em túnel fechado. Sendo a

fração líquida, transferida para o reator de fermentação e, o líquido percolado é parcialmente recirculado para o filtro e parcialmente gaseificado para a eliminação de água residual (RAPPORT, 2008).



**Figura 8 Diagrama de funcionamento de digestão por Biopercolat.**  
**Fonte: Rapport 2008.**

#### **4.4.3. Sistemas em Batelada**

Os reatores em batelada se caracterizam por não possuir, durante a reação estabelecida, carga de entrada ou de saída, sendo a alimentação do mesmo, ocorrendo uma vez por ciclo de reação. A reação em batelada leva a variação temporal na produção e composição do gás (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008).

Os sistemas em batelada possuem a característica de separação entre a primeira fase, onde a acidificação prossegue de forma muito mais rápida do que a metanogênese e, a segunda fase, em que os ácidos são transformados em biogás (PINTO, 2006).

## **COMPOTAGEM ANAERÓBIA SEQUENCIAL EM BATELADA SEQUENTIAL BATCH ANAEROBIC COMPOSTING (SEBAC)**

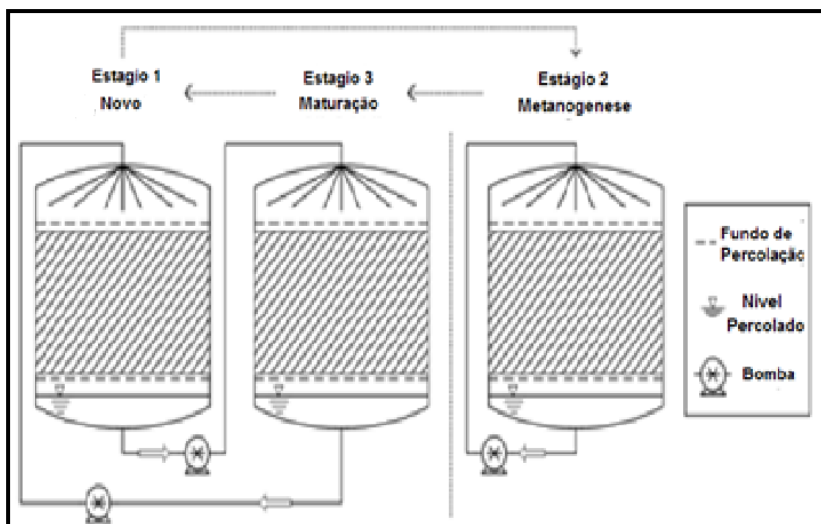
O sistema SEBAC consiste em três lotes, onde reatores de leito de lixiviação com recirculação de chorume por micro-aspersão, sendo os reatores SEBAC carregados na sequência tal que os lixiviados possam ser transferidos entre os reatores.

O sistema SEBAC é composto por três distintas etapas: Recebimento, Metanogênica e Maturação. O substrato inicialmente é colocado num reator de batelada (Recebimento), o qual recebe o lixiviado do reator de maturação. Isto permite que os micróbios dos reatores maduros passem para o primeiro, por pulverização, sobre os resíduos frescos, como um inóculo adicional. O principal processo ocorrido nesta etapa é a hidrólise, sendo a metanogênese parâmetro para o início da próxima etapa, ocorrência da metanogênese (RAPPORT, 2008).

Assim quando o processo de metanogênese este estabilizado se inicia a segunda etapa, onde o reator opera com recirculação interna, isto é, apenas lixiviado proveniente da própria operação. Tal troca permite a otimização da metanogênese (RAPPORT, 2008).

A metanogênese após iniciar um processo de diminuição inicia, portanto, a terceira etapa (Maturação), onde continua ocorrendo a metanogênese, mas agora transferindo o lixiviado para o reator inicial. Esta complicada operação com o lixiviado proporciona a melhora de cada etapa (RAPPORT, 2008).





**Figura 9 Diagrama SEBAC de funcionamento, atentar a recirculação do lixiviado em cada etapa. Fonte Rapport (2008).**

Em escala laboratorial Rapport (2008), pelo sistema SEBAC denotaram a dificuldade de partida quando carregado com resíduos puros. Devendo ser diluído a fim de evitar a compactação e permitir a drenagem de lixiviados através da pilha. No entanto, mesmo após esta melhoria, a maior taxa de produção de biogás não foi alcançada até 50-60 dia após o carregamento, sendo obtidos rendimentos entre 0,16 a 0,19  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$  com tempos de retenção de 21 e 42 dias, respectivamente.

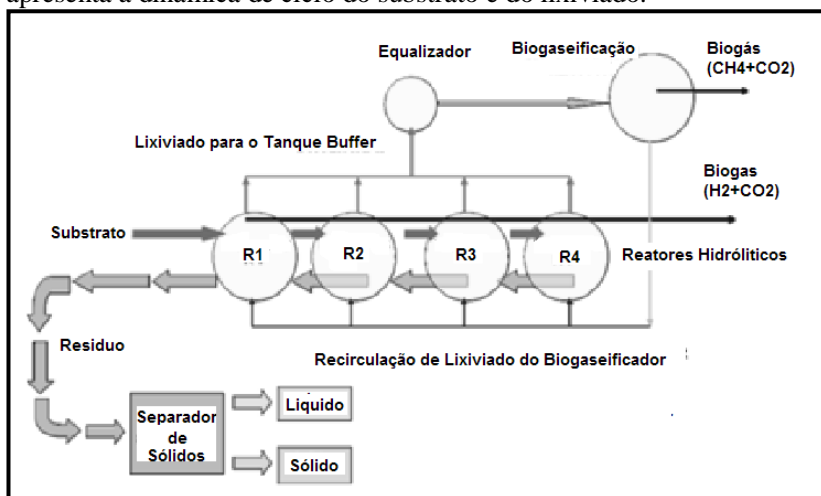
Um protótipo SEBAC operacional tipo II, operando a temperatura de 35 °C foi capaz posteriormente de alcançar uma produção de metano de 0,3  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$  em cerca de 14 dias, a partir de uma mistura de papel de arroz e alimentos para cães (FOSTER-CARNEIRO *et al*, 2004).

### **DIGESTOR ANAERÓBIO DE FASE SÓLIDA ANAEROBIC PHASED SOLIDS (APS) DIGESTER**

O sistema APS, igualmente ao sistema SEBAC, usa o carregamento em lote para estimular a produção de ácidos orgânicos

rapidamente num sistema digestor de duas fases. No entanto, o sistema APS evita os problemas causados pelo uso de reatores de leito de lixiviação através da combinação de reatores de alta carga de sólidos para a primeira fase, e um reator de biofilme à baixa concentração de sólidos misturados na segunda fase. Os reatores de alta concentração de sólidos, são carregados em lotes por fases, e os lixiviados da batelada, continuamente recirculados através de um único digestor de baixa concentração de sólidos (HARTMAN, 2004).

O carregamento em lote simplifica a manipulação de materiais, sendo os reatores de hidrólise de alta concentração de sólidos, podem lidar relativamente com grande diversidade de contaminantes inorgânicos e a recirculação de chorume, impede que sólidos se incrustem nos reator de metanogênese. Devido os lotes serem progressivos, e o chorume conter uma concentração relativamente constante de ácidos orgânicos (HARTMAN, 2004). A Figura 10 apresenta a dinâmica de ciclo do substrato e do lixiviado.



**Figura 10 Diagrama de Funcionamento do sistema APS de digestão.**  
**Fonte Adaptado de Rapport, (2008).**

Em estudos de laboratório, o sistema foi capaz de digerir a palha de arroz com um teor de ligno-celulósico (lignina, celulose e

hemicelulose) de 85% e atingir 40-60% de redução de sólidos com uma produção de biogás de 0,4-0,5 m<sup>3</sup>/kg SV.

Estudos de laboratório foram realizados com outros substratos, bem como, resíduos alimentares, FORSU, resíduos de processamento de alimentos e estrume de animais. As produções de biogás a partir dos resíduos de alimentos recolhidos em restaurantes e de resíduos verdes (aparas de relva) foram 0,60 e 0,44 m<sup>3</sup>/kg SV, respectivamente, com 12 dias de retenção de sólidos nos biodigestores (BEGGS, 2007).

Pinto (2006) por sua vez, em teste de atividade metanogênica específica para FORSU e dejetos suínos, obtiveram os piores resultados nos ensaio controle contendo somente FORSU (25,42 LCH<sub>4</sub>/kgSV<sub>adicionados</sub>) e os melhores, contendo apenas dejetos suínos (510 LCH<sub>4</sub>/kgSV<sub>adicionados</sub>) enquanto, que os ensaios contendo 40% e 50% dejetos suínos, situavam-se em um nível intermediário (293 e 225 LCH<sub>4</sub>/kgSV<sub>adicionados</sub>). Craveiro (1986) *apud* Pinto (2006), ainda relata que para lodo de esgoto obteve 540 LCH<sub>4</sub>/kgSV<sub>adicionados</sub>, valores em conformidade com os obtidos nestes sistemas.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. REATORES ANAERÓBIOS

A pesquisa por reatores mais empregados e eficiente (produção de biogás) na co-digestão de FORSU e lodo de esgoto no mundo foram realizados por meio de busca bibliográfica, em livros técnicos na área de engenharia sanitária e ambiental, como Metcalf;Eddy (2005) ou específicos sobre biogás, como Deublein e Steinhilber (2008), ou ainda, em programas institucionais brasileiro de incentivo a pesquisa no setor de saneamento, como Programa de Pesquisas em Saneamento Básico PROSAB. Já a pesquisa dos reatores comerciais mais difundidos, foi executada em sítio de internet, como Califórnia Energy Commission, seção sobre biomassa.

A Environmental Protection Agency (EPA) fornece precioso material sobre a implementação de reatores nos Estados Unidos por meio de programas, como o “Clean Energy”, “Waste-to-Energy” e “Global Methane Initiative”, os quais, além de fornecer informações sobre novas tecnologias, colaboram na troca de experiências na produção de energia limpa, incluindo a produção de biogás.

No âmbito europeu, a procura foi realizada também junto a “*Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile*” sediado em Roma, tem como objetivo a pesquisa na área de produção de energia, incluindo biodigestão anaeróbia para a produção de biogás.

### 5.2. DIMENSIONAMENTO

Segundo Igoni *et al* (2008), o dimensionamento do sistema de co-digestão anaeróbia, leva em consideração inúmeros fatores não controláveis ligadas aos resíduos que influenciam no projeto do reator, como as características físico-químicas, taxa de produção (FORSU e lodo de esgoto), e a localização (características climáticas).

Para o presente dimensionamento do reator anaeróbio de FORSU e LE, se estipulou como local de projeto a cidade e Florianópolis, localizada ao nível do mar, apresentando características climáticas inerentes do litoral sul brasileiro, com estações climáticas bem definidas (HERMANN *et al.*, 1986).

### 5.2.1. Características do Substrato

#### Lodo de Esgoto e Resíduo Orgânico

A caracterização qualitativa, quanto a série de sólidos do lodo de esgoto de estação de tratamento de efluente por lodos ativados provinda da estação de tratamento Insular, Florianópolis se baseia no histórico de análise efetuado por Donath (2010) entre o mês de agosto de 2010 a janeiro de 2011 (Anexo 1), obtendo-se, em média a concentração de ST, 22,6 g/l, sendo 73% de sólidos voláteis.

A vazão foi estimada levando em consideração a operação do recalque de lodo por 13 horas diárias, com capacidade horária de 15 m<sup>3</sup> de lodo, perfazendo aproximadamente 195m<sup>3</sup> de lodo por dia.

O resíduo orgânico no qual se estipulou o dimensionamento, provém da Central de Abastecimento do Estado de Santa Catarina (CEASA/SC), localizado na cidade de São José, região metropolitana de Florianópolis (RMF), que possui um descarte diário entre 15,2 e 5,8 toneladas (Anexo 2).

O dimensionamento do reator de mistura completa levou em consideração os parâmetros de ST 114g/kg RSO, SV 84g/kg RSO e DQO 107,8g/kg RSO, sendo tais dados, extraídos de Pinto (2006), o qual utilizou o mesmo resíduo do CEASA/SC para elaborar semelhante sistema em escala piloto para avaliar a atividade metanogênica específica, sendo efetuada apenas uma análise das características.

**Tabela 1 - Características dos substratos utilizadas. Fonte: Autor (2011)**

Substrato	Volume (m <sup>3</sup> /dia)	Carga DQO (Kg/dia)	Carga ST (Kg/dia)	Carga SV (Kg/dia)
<b>Lodo de Esgoto</b>	195,00	3.699	4.407	3.217
<b>FORSU</b>	15,16	1.622	1.728	1.270
<b>FORSU+LE</b>	210,16	4.321	5.135	4.487

Importante salientar que o lodo de esgoto representa mais de 90% da carga volumétrica diária no sistema e sua concentração de ST, SV e DQO baixa, quando comparada a FORSU que proporcionalmente responde em termo de carga orgânica em SV por quase 40% do total

salientando assim a importância da carga orgânica adicional da FORSU para o dimensionamento do reator. Rao *et al* (2010) aponta também valores elevado de produção de lodo para sistemas de tratamento de esgoto para a realidade de indiana sendo a digestão anaeróbia uma das possibilidade de tratamento do mesmo.

### Lixiviado de Resíduo Sólidos

A estimativa da produção de efluente após a degradação por via anaeróbia em reator de mistura completa dos RSO foi determinado com sendo igual a 10% da vazão do reator de mistura completa, segundo aproximação utilizada para o dimensionamento conforme elaborado por Pinto (2006). No anexo 3 é possível ver detalhadamente as características do lixiviado ao longo do tempo em termos de SV, ST e a conseqüente ST/SV (Anexo 3).

Segundo experimento elaborado por Pinto (2006), para lixiviado de lodo de esgoto e RSO em reator UASB de continua recirculação, o lixiviado apresentava valores das concentrações de sólidos conforme a

Tabela 2, sendo a relação DQO/SV igual a 1,15. Tem-se então na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a carga total gerada pelo lixiviado de resíduo sólido orgânico e o lodo de esgoto.

**Tabela 2 - Características físico-químicas do lixiviado de RSO e lodo de esgoto.**

g/l	ST	SV	SV/ST
<b>Média</b>	17,07	10,88	0,61
<b>Desvio padrão</b>	9,85	7,72	0,12
<b>Máxima</b>	49,04	36,13	0,91
<b>Mínima</b>	8,39	3,79	0,36

O lixiviado de RSO e lodo de esgoto apresentam uma grande variabilidade conforme se nota pela diferença entre os valores máximos e mínimos para ST e SV bem como o desvio padrão representar próximo de 60% da média.

### 5.2.2. Tipo de Reator

Optou-se por um sistema com dois reatores, um de mistura completa, seguido por um reator UASB, devido flexibilidade de operação de ambos os reatores, maximizando a produção de biogás. Além disso, a similaridade dos substratos neste trabalho está próximo as utilizadas por Pinto (2006) que utilizou lodo de fossa séptica e FORSU oriundos também do CEASA/SC. Este paralelo entre os trabalhos possibilita uma projeção de produção de biogás, previamente verificada.

### 5.2.3. Cálculo dos Reatores

#### Reator Mistura Completa

O dimensionamento dos reatores foi elaborado tomando como base o histórico de produção diária de FORSU provindo do CEASA/SC, e o histórico de produção de lodo de esgoto de uma unidade de tratamento de efluente, por lodos ativados de Florianópolis, conforme os dados apresentados na Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada..** O volume pode ser calculado pela equação 1 formula extraída de METCALF; EDDY, (2004):

$$V_{\text{rea}} = \text{TDH} \cdot Q \quad (1)$$

Onde:

$V_{\text{rea}}$ : Volume de Reação ( $\text{m}^3$ );

$Q$ : Vazão Substrato ( $\text{m}^3/\text{dia}$ );

T.D.H: Tempo de Detenção Hidráulica (dia)

A fim de verificar a capacidade do volume em degradar o substrato, se verifica a carga orgânica segundo a equação 2 (em termo de SV) METCALF; EDDY (2004).

$$TCO = \frac{C_{sv}}{V_{\text{rea}}} \quad (2)$$

Onde:

TCO: Taxa de carga orgânica

$V_{\text{rea}}$ : Volume de Reação ( $\text{m}^3$ );

$C_{sv}$ : Carga de Sólidos Voltaeis ( $\text{KgSV}/\text{dia}$ );

A estimativa de degradação de sólidos voláteis pode ser dada pela equação empírica (equação 3) obtida por Liptak (1974) *Apud* Metcalf; Eddy (2004).

$$V_d = 13,7 \cdot \ln(TDH) + 18,9 \quad (3)$$

Onde:

$V_d$ : Degradação Sólidos Voláteis (%)

TDH: Tempo de Detenção Hidráulico (dia);

Reator “Upflow Anaerobic Sludge Blanked”

O reator UASB na presente conjuntura possui como afluente, o lixiviado do reator de mistura completa, descrito anteriormente.

Segundo a equação 4 extraída de Metcalf e Eddy (2004), o volume efetivo de tratamento pode ser obtido por:

$$V_n = \frac{Q \cdot S_o}{L_{org}} \quad (4)$$

Onde:

$V_n$ : Volume Nominal de Reação ( $m^3$ );

Q: Vazão do Efluente ( $m^3/dia$ );

$S_o$ : Concentração de DQO ( $kgDQO/m^3$ )

$L_{org}$ : Carga Orgânica Volumétrica ( $kgDQO/m^3.dia$ )

Volume efetivo de reação, pode ser extraído pela seguinte formula 5 de segurança extraída de Metcalf e Eddy (2004):

$$V_{ef} = \frac{V_n}{FS} \quad (5)$$

Onde:

$V_{ef}$ : Volume Efetivo ( $m^3$ );

FS: Fator de Segurança (Adimensional)

Sendo a área superficial calculada pela equação 6:

$$A_{Sup} = \frac{V_{ef}}{H} \quad (6)$$

Onde:

$A_{sup}$ : Área Superficial ( $m^2$ );

$V_{ef}$ : Volume Efetivo ( $m^3$ );

H: Altura do Liquido (m)



A velocidade de ascensão, parâmetro do UASB segundo Metcalf e Eddy (2004) calculada pela formula 7:

$$V_{asc} = Q/A_{sup} \quad (7)$$

Onde:

$V_{asc}$ : Velocidade de Ascensão (m/h);

$Q$ : Vazão do Efluente (m³/dia);

$A_{sup}$ : Área Superficial (m²);

O dimensionamento levou em consideração os valores apresentados anteriormente, sendo o volume de reação obtido conforme explanado na metodologia para reator de mistura completa.

**Tabela 3 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do reator UASB.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observação</b>
<b>Vazão</b>	m³/dia	10,5	Estimado segundo Pinto (2006)
<b>Carga ST</b>	Kg/dia	179,0	Estimado baseado em Pinto (2006)
<b>Carga SV</b>	Kg/dia	114,00	Estimado baseado em Pinto (2006)
<b>S<sub>o</sub></b>	KgDQO/m³	17,41	Estimado baseado em Pinto (2006)
<b>L<sub>o</sub></b>	KgDQO/m³.dia	10	Metcalf;Eddy (2004)
<b>FS</b>	Adimensional	0,85	Adotado Metcalf;Eddy (2004)
<b>Altura</b>	m	5,5	Adotado Metcalf;Eddy (2004)

#### **5.2.4. Estimativa Produção Metano**

A estimativa de produção de metano possui como base, o piloto analisado por Pinto (2006), onde a proximidade, em termos de substrato e configuração dos reatores, torna possível a extrapolação dos resultados de obtenção de metano.

A produção de metano pode ser estimada segundo a taxa de produção de biogás média em relação carga de sólidos voláteis, adicionadas no reator de mistura completa ou carga de DQO adicionado no reator UASB. Ambos obtidos em estudos anteriores, em condições

similares. Tem-se então, a seguinte equação 8 para o cálculo de produção de biogás:

$$Q_a = R_a \cdot C \quad (8)$$

Onde:

$Q_a$ : Vazão de Biogás ( $m^3/dia$ );

$R_a$ : Taxa de conversão SV em biogás ( $m^3CH_4/kgSV$  ou  $kgDQO$ )

$C$ : Carga Orgânica degradada em termos de SV ou DQO ( $kgSV$  ou  $kgDQO/dia$ )

### 5.2.5. Geração de Energia

O potencial energético do biogás segundo Deublein e Steinhäuser (2008) é definido como a energia gerada por um metro cúbico de metano, sabendo o volume diário de biogás produzido é possível calcular pela equação 10 a seguir o potencial de geração de energia elétrica:

$$E = Q_t \cdot E_{esp} \cdot \eta \quad (10)$$

Onde:

$E$ : Potencial Geração Elétrica (kW)

$Q_t$ : Vazão de Metano Horária ( $(Q_a + Q_b)(Nm^3CH_4/h)$ );

$E_{esp}$ : Potencial Energético Específico de  $CH_4$  ( $kWh/m^3CH_4$ );

$\eta$ : Eficiência em conversão energética (%).

## 5.3. ANÁLISE ENERGÉTICA

### 5.3.1. Balanço Energético

A viabilidade do sistema foi analisada, segundo o tempo de retorno energético, metodologia estipulada por Ishikawa (2006) na análise do ciclo de vida de reatores de biogás. Tal análise permite estimar o balanço energético do projeto, da implantação à sua operação, verificando o tempo de retorno em termo de energia investida (MORIN, 2010). A equação 11 a seguir, faz o balanço energético dos sistemas de digestores anaeróbios.

$$TRE = \frac{EI}{EG - EC} \quad (11)$$

Onde

TRE: Tempo de Retorno Energético (anos)

EI: Energia Investida (GJ);

EG: Energia Gerada (GJ/ano);

EC: Energia Consumida Internamente (GJ/ano);

Sendo a energia de instalação possível de estimar por meio da equação elaborada por Morin (2010), que para reatores com capacidade de tratamento de aproximadamente 0,5 ton por hora, possuem expoente igual a 0,6624 e, uma relação com a capacidade de tratamento de 0,208 toneladas por hora.

$$EI = 42000 \left( \frac{CP}{0,208} \right)^{0,6624} \quad (12)$$

Onde:

EI: Energia de Instalação (GJ);

CP: Capacidade Planta (toneladas ST/h);

## 6. RESULTADO

### 6.1. REATORES ANAERÓBIOS

Resumidamente a Tabela 4 apresenta as aplicações dos diversos reatores descritas bem como eficiência em conversão da matéria orgânica em biogás. É possível verificar a gama de substratos possíveis de serem utilizados para os presentes reatores

**Tabela 4 - Resumo das características dos sistemas descritos de digestão anaeróbia. Fonte: Rapport, (2009).**

TECNOLOGIA	TRS OU TDH	CARGA APLICAÇÃO CARACTERÍSTICA	SUBSTRATO MAIS USADO	PRODUÇÃO DE BIOGÁS
WAASA	-	4-8 KgSV.dia <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup>	10-15% ST	0,417 m <sup>3</sup> /kg.SV
VALORGA	TRS 18-23 dias		25-30% ST	
KOMPOGAS	TRS 15-20 dias		FORSU-Efluente	0.11 - 0,13 m <sup>3</sup> /kg <sub>resíduo</sub>
Biocel	-	7 KgSV.dia <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup>	25-35% ST (FORSU-LE)	0,7 m <sup>3</sup> /kg <sub>ResSeco</sub>
SEBAC	TRS 21-42 dias		FORSU-LE	0,16-0,19 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgSV
SEBACII	TRS 14 dias		Alimento p/ cães, papel, arroz.*	0,3 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgSV
APS	TRS 12 dias		FORSU	0,4-0,5 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV

Verifica-se a nos sistema uma variação em seu tempo de detenção hidráulica entre 12 e 42 dias. Os substratos possíveis de serem digeridos variam entre 10% a 35% de sólidos totais já em termo de produção de biogás é possível verificar uma eficiência entre 0,1 a 0,7 m<sup>3</sup>/KgSV conforme apresenta, num resumo de digestores anaeróbios, Gunaseelan (1997).

## 6.2. DIMENSIONAMENTO REATORES

### 6.2.1. Reator Mistura Completa

O dimensionamento levou em consideração os valores apresentados anteriormente, sendo o volume de reação obtido conforme explanado na metodologia para reator de mistura completa (Tabela 5).

**Tabela 5 - Resultados do dimensionamento para o reator de mistura completa**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
<b>Volume Total</b>	m <sup>3</sup>	3.120	TDH: 14,5 (Gunaseelan, 1997); Vazão: 210m <sup>3</sup> /dia;
<b>Volume Por Reator</b>	m <sup>3</sup>	1.040	Adota-se 3 reatores (Metcalf;Eddy, 2004)
<b>Altura Reatores</b>	m	5,5	Conforme reatores existentes Rapport (2009)
<b>Diâmetro Interno</b>	m	15,5	Conforme reatores existentes Rapport (2009)
<b>Matéria Orgânica Degradada (C<sub>v</sub>)</b>	KgSV/dia	2.824	Liptak (1979) apud Metcalf Eddy (2004)

A verificação segundo a carga orgânica degradada, por metro cúbico de reator, é de aproximadamente 1,44KgSV/m<sup>3</sup>.dia, valores dentro do recomendado para reatores anaeróbios. No reator de mistura completa a carga total de SV voláteis na entrada do sistema é de 4.485KgSV/dia, segundo a equação 3 estipulada por Liptak (1979) para a estimativa de degradação da matéria sólida volátil, que para o presente tempo de detenção temos ao fim 1.661KgSV/dia remanescentes no digestor obtendo portanto a degradação de 2.824 KgSV/dia.

Kramer, (2008) mapeando os digestores anaeróbios no estado do Wisconsin, se verifica digestores tipos Valorga com volumes maiores na degradação de FORSU e LE a presente comparação do sistema Valorga e o sistema dimensionado é possível devido à alta semelhança entre os sistemas. Por sua vez, Ishikawa (2006) para reatores anaeróbios de mistura completa na digestão de estrume possui volume de 1.500m<sup>3</sup>, sendo a vazão de 50m<sup>3</sup>/dia sendo o tempo de detenção de 30 dias. Para

Donath (2010) num pré dimensionamento para lodo de esgoto de uma estação de tratamento por lodos ativados, encontrou volumes total de 3.060 m<sup>3</sup> divididos em dois reatores.

### Reator UASB

O dimensionamento levou em consideração os valores de DQO, ST e SV presentes na Tabela 6, onde o volume de reação é obtido conforme explanado na metodologia e parâmetros da Tabela 3 os resultado são apresentado para o reator UASB na Tabela 7.

**Tabela 6 - Estimativo das características do lixiviado de entrada no reator UASB.**

<b>Geração Diária</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga DQO (Kg)</b>	<b>Carga ST (Kg)</b>	<b>Carga SV (Kg)</b>
<b>Lixiviado</b>	10,5	163,2	179,0	114,0

**Tabela 7 - Resultado do Dimensionamento do Reator UASB**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
<b>Volume Total</b>	m <sup>3</sup>	31,0	Parâmetros Utilizados segundo Tabela 3
<b>Altura</b>	m	5,5	Adotado Segundo Metcalf; Eddy (2004)
<b>Diâmetro</b>	m	2,7	-

Segundo os valores se obtém então uma área superficial de 5,64 m<sup>2</sup>, sendo escolhida a seção circular, por permitir melhor homogeneização, com diâmetro igual a 2,70 m. Segundo tais escolhas, o reator possui velocidade de ascensão aproximadamente de 0,11m/h, condizentes à reatores UASB encontrados em Metcalf; Eddy (2004).

### 6.3. GERAÇÃO ENERGIA

#### 6.3.1. Geração Metano

O volume de metano gerado pelo reator de mistura completa foi obtido segundo a metodologia explanada no item 5.2.4, onde segundo os dados apresentados na Tabela 8 **Erro! Auto-referência de indicador não válida..**

**Tabela 8 – Resultados e parâmetros utilizados para a produção de metano no Reator de Mistura Completa**

Parâmetro	Unidade	Valor	Observação
Vazão	m <sup>3</sup> /dia	847	R <sub>a</sub> =0,3 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgSV Adotado C <sub>sv</sub> =2.824 kgSV/dia Tabela 5

O volume de metano gerado pelo UASB foi obtido segundo a metodologia explanada no item 5.2.4 para este mesmo tipo de reator, onde segundo os dados apresentados no Tabela 9.

**Tabela 9 – Resultado e Parâmetros utilizados para análise da produção de metano reator UASB.**

Parâmetro	Unidade	Valor	Parâmetros Utilizados
Vazão	m <sup>3</sup> /dia	59	R <sub>a</sub> = 0,323 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgDQO Adaptado de Pinto (2006); C <sub>sv</sub> =163 kgDQO/dia Item 5.2.5

A partir da somatória dos dados obtidos nos itens anteriores, o volume total de metano diário estimado é de 906 m<sup>3</sup>, num total anual de 330.790 m<sup>3</sup>. Para Donath (2010) com um reator semelhante, estimou uma produção diária de quase 2.000m<sup>3</sup>/dias, a diferença se deve principalmente, pois no presente trabalho estimou-se a produção de biogás segundo a carga de SV degradada, segundo a equação de Liptak (1979) *apud* METCALF; EDDY (2004) e não a de entrada.

Dada a produção de biogás, o reator de mistura completa é responsável por mais de 94% da geração de biogás de todo o sistema, enfatizando que o sistema possui dois reatores em sequência, sendo o UASB responsável pela degradação do lixiviado do reator de mistura completa.

### 6.3.2. Geração Total de Energia

O volume gerado, segundo a metodologia aplicada, leva em consideração os seguintes dados da Tabela 10.

**Tabela 10 Parâmetros e utilizados para análise do potencial energético**

Parâmetro	Unidade	Valor	Observação
<b>Potencial Energético</b>	kW	150	$Q_{\text{thor}}$ 37,75 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /h; $E_{\text{Esp}}$ 9,94 kWh/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> $\eta = 40\%$

Assim, se obtém potência de 150kW, sendo que segundo Deublein e Steinhauser (2008), em uma planta de biogás, o auto consumo corresponde entre 20 e 30% da energia produzida pela geração de energia do biogás. Ao final, a energia disponível ao comércio se apresenta em torno de 120kW e 105kW.

### 6.4. ANÁLISE ENERGÉTICA

O cenário utilizado para a análise energética levou em consideração a construção de um novo sistema de digestores anaeróbios, implantados junto ao sistema gerador de LE. A capacidade de tratamento do sistema foi estimada de acordo com a Tabela 1, de aproximadamente 5 toneladas de matéria sólida total por dia.

A energia necessária à instalação do sistema, que é de aproximadamente 42.000 GJ. A estimativa de energia gerada é de 150 kW, que num ano, corresponde a 3.646 GJ. Já o consumo energético interno, segundo estimativas dadas por Deublein e Steinhauser (2008), foi estipulado em 25% da energia gerada, totalizando 37 KW, que por sua vez, num ano corresponde a 1.088 GJ. A seguir, se visualiza os valores obtidos de energia de instalação e operação, além do tempo de retorno energético do sistema (Tabela 11).



**Tabela 11 - Parâmetros dos valores para a análise energética, bem como os resultados obtidos**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observação</b>
<b>Energia de Instalação (EI)</b>	GJ	42000	Recalculada segundo MORIN, 2010
<b>Energia Gerada (EG)</b>	GJ/ano	3646	Item 7.2.4
<b>Energia Consumida (EC)</b>	GJ/ano	1088	Item 7.2.4
<b>Tempo de Retorno Energético</b>	Anos	16,5	-

Os resultados se encontram em consonância aos obtidos por Morin (2010), o qual, numa pré análise da viabilidade financeira e energética para cenários de aproveitamento energético do biogás por digestão anaeróbia de resíduos municipais, obteve tempo de retorno energético entre 3,3 e 30 anos. Ishikawa (2006) por sua vez obteve tempos de retorno de 16 anos para reatores anaeróbios de estrume como substrato.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### Conclusões

Os digestores anaeróbios para lodo de esgoto e fração orgânica de resíduos sólidos buscou neste trabalho, foi elaborado a fim de disseminar as tecnologias internacionalmente conhecidas e capazes (em termos tecnológicos e energéticos) de serem implantados diante da realidade brasileira, foram descritos três reatores de estágio único, um reator em batelada e dois reatores em múltiplos estágios.

Verificou-se o grande numero de parâmetros e requisitos a serem considerados no dimensionamento de reatores anaeróbios, podendo citar a temperatura, razão de nutrientes do substrato a serem digeridos, tamanho das partículas e tempo de detenção hidráulica. Podendo citar entre requisito de controle do meio pH, alcalinidade, potencial redox e por fim o controle de substancias inibidoras dos processos biológicos.

Os reatores dimensionados são capazes de tratar até 210m<sup>3</sup> de substrato dia, projetado para três reatores com 1.040 m<sup>3</sup> cada, e um UASB de 30m<sup>3</sup>, que em conjunto, num cenário ideal, produz até 906m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> /dia.

O sistema de reatores identificou o potencial energético da co digestão de dois insumos abundantes para a realidade de Florianópolis, os quais em conjunto, proporcionaram uma estimativa de 150kW de energia gerada, estando em conformidade com valores obtidos em estudo anteriores.

### Recomendações

Avaliar as características do LE e do FORSU produzido em Florianópolis, para se estimar parâmetros de projeto de digestores mais condizentes com a situação problema;

Análise detalhada do ciclo de vida de digestores anaeróbios;

Análise detalhada do aspecto financeiro da implantação de reatores anaeróbios para co digestão de LE e FORSU;

Avaliar o potencial de produção de calor para manutenção de um sistema termofílico;

Implementação do modelo Anaerobic Digestion Model 1 da IWA que descreve a via de indicadores na digestão anaeróbia; e,

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 71 p., 2004.

BEGGS, R.D., R. KONWINSKI, R.H. ZHANG, and P. SHAFFER. **Anaerobic Phased Solids Digestion of Mixed Wastes**. in Proceedings of Water Environment Federation's Annual Technical Exhibition and Conference. 2007.

BRASIL Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2010** – Ano base 2009: Resultados Preliminares Rio de Janeiro: EPE, 2010, 54 p.

CALIFORNIA. **California Energy Commission**. Disponível em: <<http://www.energy.ca.gov/biomass.>>. Acesso em: 14 abr. 2011.

CASSINI, S. T. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental . Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES; São Paulo: RiMa, 2003. 196 p. (Lodo)

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**, 1a ed. Belo Horizonte, UFMG/ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 5, 246 p., 1997.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Weinheim Wiley-VCH, 2008. 443p.

DONATH, F. **Pré-dimensionamento de um digestor anaeróbio para o tratamento do lodo de estação de tratamento de esgoto doméstico**. Florianópolis, 2010.

FORSTER-CARNEIRO, T., L.A. FERNANDEZ, M. PEREZ, L.I. ROMERO, AND C.J. ALVAREZ, Optimization of SEBAC start up phase of municipal solid waste anaerobic digestion. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, 2004. 18(4): p. 429-439.

GUNASEELAN V.N.. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. **Biomass and Bioenergy**, 13(1-2), 83-114

HARTMAN, K., APS-Digester for the treatment of organic solid waste and power generation: UC Davis Digester Design, in **Biological and**

**Agricultural Engineering**, University of California, Davis: Davis, Calif. p. 54.

HERMANN, M. L. P.; *et al*: **Aspectos ambientais dos entornos da porção Sul da Lagoa da Conceição**. Geosul, Florianópolis, UFSC, 1986, pág. 07 a 41.

HENN, A. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condição de partida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. 157 p., 2005.

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, PNSB, 2008**. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

IGONI, A.H *et al*. Designs of Anaerobis digester for producing biogás from solid-waste. **Applied Energy**. N.85, 430-438. 2008.

ITALIA. **Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo econômico sostenibile**, Disponível em <http://www.enea.it/index.html>. visitado em 14/04/2011.

ISHIKAWA, S., *et al* **Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA)**. International Congress Series 1293 (2006) 230–233

KIM, M.; AHN, Y.-H; SPEECE, R.E. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. Thermophilic. **Water research**. n. 36, p. 4369-4385, 2002.

KHANAL, S.K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and application**. 2008. 308p.

KRAMER, J. **Wisconsin Agricultural Biogas Casebook**, ENERGY CENTER OF WISCONSIN July 2008 Edition.

LEHNINGER, Albert Lester; NELSON, David L.; FOX, Michael M. **Princípios de Bioquímica**. 4. ed. São Paulo: Sarvier, 2006. 1201 p.

LI, Y.; PARK, S. Y; ZHU, J. **Solid-State anaerobic digestion for methane production from organic waste**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Artigo em Impressão, 2010.

LIN, C.Y.; CHANG, F.Y.; CHANG C.H. Co-digestion of leachate with septage using a UASB reactor. **Bioresource Technology**, 73, p. 175-178, 2000

MATA-ALAVAREZ, J., CECCHI, F., PAVAN, P. and LLABRES, P., The performance of digesters treating the organic fraction of municipal solid wastes differently sorted. **Biological Wastes**, 1990, 33, 181-199.

MORIN, P.; MARCOS, B.; MORESOLI, C.; LAFAMME, C.B. Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada, **Applied Energy**, 87 (2010) 275–283.

Ministério de Minas Energia. **Matriz Energética Nacional 2030** colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME : EPE, 2007 254p.

PINTO, R. de O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PROSAB – **Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto**. Edital 4. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 398p.

PROSAB – **Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Usos alternativos de lodos de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto**. Edital 2. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 398p.

RAO P.V., BARAL.S.S, DEY, R., MUTUNURI, S. Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010, Vol 14, pg 2086-2094.

RAPPORT, JOSHUA.. **Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste**. California Environmental Protection Agency Estados Unidos, California. 2008.

TUROVSKIY IS, MATHAI PK. **Wastewater sludge processing**. New York: Wiley, 2006. 383 p.

SOSNOWSKI, P.; WIECZOREK, A.; LEDAKOWICZ, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. **Advances in Environmental Research**, Vol. 7 Issues 3.

MATTOCKS, R.. **Understanding biogas generation**. Technical Paper n.4. Volunteers in Technical Assistance. Virginia, USA; 1984 p13.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH F.. **Handbook of Solid Waste Management**. 2<sup>a</sup> Ed, New York: McGraw-Hill, 2002. 832p.

USEPA, **Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal**, EPA 625/1-79/011, WASHINGTON, DC, 1979.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. **Types of anaerobic digesters for solid wastes**. In: MATA-ALVAREZ, J. (Org.). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing, 336 p., 2002.

WANG, L. K SHAMMAS N. K. AND HUNG Y. T.. **Transport and Pumping of Sewage Sludge and Biosolids**. In: **Handbook of Environmental Engineering**, Vol. 7, Humana Press Inc., Totowa, NJ, U.S.A. Chapter 1. 2008. pp. 1-64

## ANEXO 1

Dados coletados do lodo adensado de estação de tratamento de efluente por lodos ativados

<b>g sólidos adensados/ litro</b>				
<b>Data</b>	<b>ST</b>	<b>SF</b>	<b>SV</b>	<b>SV/ST</b>
<b>19/08/10</b>	26,5	7,5	19,0	0,7
<b>23/08/10</b>	25,8	6,3	19,5	0,8
<b>26/08/10</b>	25,5	6,2	19,3	0,8
<b>02/09/10</b>	29,7	7,0	22,7	0,8
<b>06/09/10</b>	24,0	5,9	18,0	0,8
<b>09/09/10</b>	22,8	5,3	17,5	0,8
<b>13/09/10</b>	21,5	4,9	16,6	0,8
<b>16/09/10</b>	21,5	4,7	16,7	0,8
<b>20/09/10</b>	20,9	4,7	16,2	0,8
<b>23/09/10</b>	22,7	5,2	17,5	0,8
<b>27/09/10</b>	27,8	6,9	20,9	0,8
<b>30/09/10</b>	29,5	7,2	22,3	0,8
<b>04/10/10</b>	28,3	6,8	21,5	0,8
<b>08/10/10</b>	25,4	6,1	19,2	0,8
<b>11/10/10</b>	26,3	9,3	17,0	0,6
<b>15/10/10</b>	27,8	7,0	20,9	0,7
<b>18/10/10</b>	23,0	5,9	17,1	0,7
<b>20/10/10</b>	23,3	5,9	17,4	0,7
<b>22/10/10</b>	25,6	6,6	19,0	0,7
<b>25/10/10</b>	17,6	5,6	12,0	0,7
<b>29/10/10</b>	21,1	6,3	14,8	0,7
<b>01/11/10</b>	18,8	6,2	12,7	0,7
<b>05/11/10</b>	27,2	7,0	20,2	0,7
<b>08/11/10</b>	23,6	6,1	17,5	0,7

<b>12/11/10</b>	20,8	5,5	15,3	0,7
<b>16/11/10</b>	24,1	5,9	18,0	0,7
<b>19/11/10</b>	23,6	5,7	18,0	0,8
<b>22/11/10</b>	22,1	5,5	16,6	0,7
<b>26/11/10</b>	20,4	5,1	15,3	0,7
<b>29/11/10</b>	15,2	4,2	11,1	0,7
<b>03/12/10</b>	20,1	5,2	14,9	0,7
<b>06/12/10</b>	20,3	5,2	15,1	0,7
<b>10/12/10</b>	14,9	7,4	7,5	0,5
<b>17/12/10</b>	18,2	6,0	11,4	0,6
<b>20/12/10</b>	25,2	6,9	18,3	0,7
<b>23/12/11</b>	18,4	5,6	12,6	0,7
<b>27/12/11</b>	22,9	5,7	17,2	0,8
<b>30/12/11</b>	16,4	5,1	11,4	0,7
<b>03/01/11</b>	24,2	6,4	17,7	0,7
<b>06/01/11</b>	22,4	6,4	16,0	0,7
<b>10/01/11</b>	20,9	5,6	15,2	0,7
<b>17/01/11</b>	19,2	5,3	14,0	0,7
<b>20/01/11</b>	16,7	6,0	11,1	0,7
<b>MÁXIMO</b>	29,71	9,31	22,73	0,78
<b>MÍNIMO</b>	14,95	4,17	7,52	0,50
<b>MÉDIA</b>	22,61	6,04	16,56	0,73



## ANEXO 2

### Produção de Resíduos do CEASA/SC

	<b>2009</b>	<b>2010</b>
<b>Mês</b>	<b>Tonelada</b>	<b>Toneladas</b>
Janeiro	257,36	455,94
Fevereiro	265,33	377,28
Março	210,03	232,66
Abril	211,40	229,67
Maio	216,72	245,73
Junho	130,08	174,10
Julho	136,66	176,63
Agosto	66,47	105,42
Setembro	118,87	128,33
Outubro	141,94	174,68
Novembro	147,23	156,42
Dezembro	455,94	322,87
Total	2358,03	2779,73

### ANEXO 3

Dados da composição do lixiviado de RSO e lodo de esgoto

ST (g/l)	SV (g/l)	SV/ST
44,66	32,51	0,7
28,5	19,86	0,7
18,27	13,39	0,7
15,62	10,17	0,7
16,13	10,58	0,7
15,06	9,94	0,7
16,63	11,71	0,7
15,05	10,014	0,7
9,3	4,49	0,5
15,98	12,17	0,8
16,05	9,26	0,6
12,67	8,95	0,7
13,66	9,23	0,7
12,19	8,09	0,7
10,31	5,38	0,5
11,66	6,75	0,6
10,268	5,412	0,5
11,23	6,296	0,6
8,973	4,003	0,4
9,289	4,441	0,5
10,972	4,879	0,4
11,591	5,471	0,5
8,742	5,87	0,7
8,388	3,792	0,5

	28,64	22,63	0,8
	17,03	11,16	0,7
	49,04	36,13	0,7
	35,33	22,64	0,6
	21,57	11,51	0,5
	19,72	9,98	0,5
	17,96	8,88	0,5
	13,14	4,81	0,4
	9,58	8,73	0,9
<b>Média</b>	17,07	10,88	0,610566
<b>Desvpad</b>	9,85	7,72	0,12
<b>Máxima</b>	49,04	36,13	0,91
<b>Mínima</b>	8,39	3,79	0,36